

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА КОНСОЛИДАЦИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ВЯЗКИХ ГРУНТОВ

<https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-64-72>

УДК 624.131



БЕЗВОЛЕВ С.Г.

НИИОСП им. Н.М. Герсеевского АО «НИЦ «Строительство»», г. Москва, Россия, compgeo@yandex.ru

Адрес: Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Россия

Аннотация

В вводной части статьи описаны разновидности водонасыщенных грунтов, обладающих существенным вязким и фильтрационным сопротивлением объемному деформированию. Кратко охарактеризован разработанный для решения таких задач инженерный метод расчета, отмечены его практические ограничения и область применения. В основной части сообщения изложена комбинированная методика адекватного определения консолидационных параметров водонасыщенных вязких грунтов по данным лабораторного испытания рабочей нагрузкой посредством выделения стадий преимущественно первичной (фильтрационной) и вторичной (ползучей) консолидации грунта и согласования их опытных графиков с теоретическими зависимостями. Выполнен анализ нередко используемого на практике способа расчета коэффициента фильтрации грунта с использованием известного теоретического выражения Терцаги по величинам коэффициентов консолидации и сжимаемости. Этот способ нельзя считать корректным, потому что коэффициент сжимаемости является показателем стабилизированной деформации сжатия, включая ее вязкопластическую часть, в то время как в формуле Терцаги величине коэффициента консолидации соответствуют исключительно упруго-мгновенные деформации, характерные лишь для начального фильтрационного этапа. Рассмотрен пример определения консолидационных параметров водонасыщенного слоя текучего суглинка при проектировании на заболоченной территории предпостроечного намывного основания под застройку жилого микрорайона. Описаны методики отбора и испытаний образцов с ненарушенной природной структурой. Приведены результаты расчета развития во времени осадок натурного слоя суглинка с использованием полученных консолидационных параметров. В заключение отмечено, что разработанная методика определения параметров создает предпосылки для внедрения в проектную практику эффективных методов консолидационных расчетов, позволяющих осуществлять всесторонний учет условий, влияющих на выбор рационального типа и конструктивных решений основания и фундаментов.

Ключевые слова:

водонасыщенный вязкий грунт; первичная и вторичная консолидация; фильтрационное сопротивление; вязкость; ползучесть; определение параметров

Ссылка для цитирования:

Безволев С.Г., 2018. Комплексная методика определения параметров инженерного расчета консолидации водонасыщенных вязких грунтов. Инженерная геология, Том XIII, № 4–5, с. 64–72, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-64-72>

A COMPREHENSIVE METHOD FOR DETERMINING THE ENGINEERING CALCULATION PARAMETERS FOR THE CONSOLIDATION OF WATER-SATURATED VISCOUS SOILS

STEPAN G. BEZVOLEV

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), JSC Research Center of Construction, Moscow, Russia, compgeo@yandex.ru
 Address: Bld. 59, Ryazansky Ave, 109428, Moscow, Russia

Abstract

The introductory part of the article describes varieties of water-saturated soils that have a significant viscous and filtration resistance to volumetric deformation. The engineering method of calculation developed for solving such problems was briefly described, its practical limitations and scope were noted. The main part of the article describes a combined methodology for the adequate definition of consolidation parameters of water-saturated viscous soils, according to the laboratory test by working load, by separating the stages of primary (filtration) and secondary (creeping) soil consolidation and matching their experimental plots with theoretical dependencies. An analysis of the method of calculating the soil filtration coefficient, which is often used in practice, is performed using the well-known theoretical expression of Terzaghi in terms of the values of the consolidation and compressibility coefficients. This method can not be considered correct, because the compressibility factor is an indicator of the stabilized compression deformation, including its viscoplastic part, while in the Terzaghi formula, the magnitude of the consolidation coefficient corresponds solely to elastic-instantaneous deformations, characteristic only for the initial filtration stage. An example of the determination of the consolidation parameters of a water-saturated layer of fluid loam is considered when designing a pre-built erosion foundation for the construction of a residential micro-district in the marshy area. The methods of selection and testing of samples with an unstrained natural structure are described. The results of calculating the development over time of sediments of the natural layer of loam on the basis of the consolidation parameters obtained are given. In conclusion, it is noted that the developed methodology for determining parameters creates the backgrounds for the introduction in the project practice of effective methods of consolidation calculations that allow for the comprehensive consideration of conditions that affect the choice of rational type and design solutions of foundations.

Key words:

water-saturated viscous soil; primary and secondary consolidation; filtration resistance; viscosity; creep; determining the parameters

For citation:

Bezvolev S.G., 2018. A comprehensive method for determining the engineering calculation parameters for the consolidation of water-saturated viscous soils. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 4–5, pp. 64–72, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-64-72>

Введение

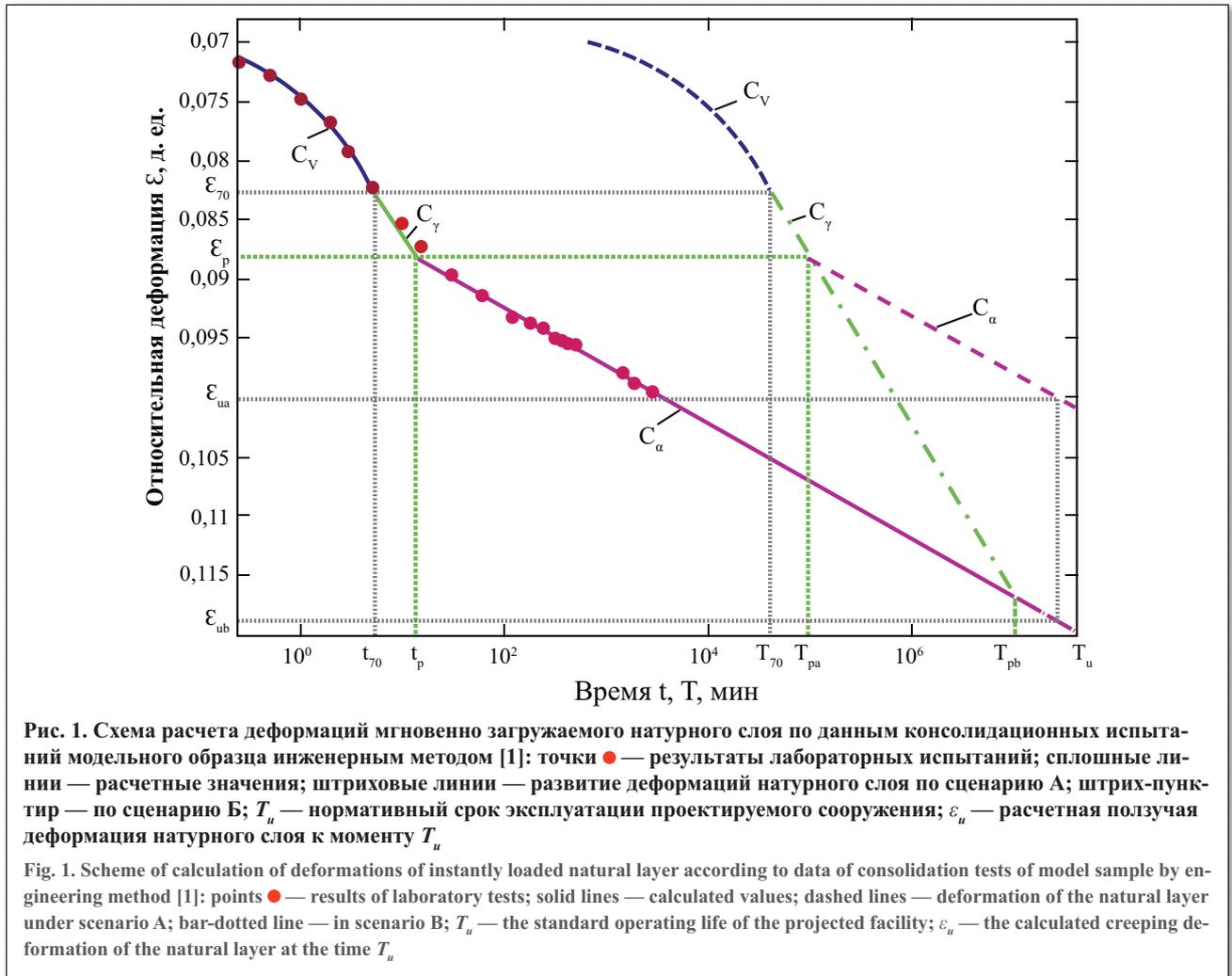
Водонасыщенные пылеватого-глинистые и органоминеральные (ил, торф и пр.) грунты обладают существенным вязким и фильтрационным сопротивлением объемному деформированию. В зависимости от соотношения между скоростью вязкой деформации и ограниченной фильтрационным сопротивлением скоростью отжатия воды из пор грунта происходит либо затрудненный дренаж, вызывающий релаксацию эффективного напряжения, сопровождаемую возрастанием избыточного порового давления, либо свободный дренаж, который способствует вязкопластическому нарастанию деформации ползучести.

В нашей работе, посвященной грунтам с подобными свойствами [1], описан ряд актуальных консолидационных задач, охарактеризованы теоретическое состояние вопроса и рекомендации действующих норм по расчетам консолидации и ползучести, показана проблематичность

их использования в практике проектирования, и представлены некоторые практические способы прогнозирования осадков во времени. Для решения широкого класса проектных задач в [1] предложен усовершенствованный инженерный метод расчета¹ первичной и вторичной консолидации медленно деформируемых водонасыщенных грунтов с использованием параметров фильтрационной (первичной) и ползучей (вторичной) консолидации грунта, а также промежуточной (переходной) стадии.

Для внедрения в проектную практику эффективных методов консолидационных расчетов и получения адекватных результатов необходимо наличие подробной методики определения привлекаемых параметров грунта, которая должна учитывать особенности расчетной модели, для которой эти параметры предназначены. Разработке практической методики определения достоверных параметров сжимаемости, ползучести и фильтрации, необхо-

¹ Здесь и далее термин «инженерный метод» используется в значении, принятом у проектировщиков и геотехников, а именно в значении «достаточно простой, использующий аналитические формулы и таблицы, выверенный для обеспечения надлежащей надежности на эмпирических данных, метод», в отличие от теоретических численных и сложных аналитических решений.



димых для расчета инженерным методом [1], посвящена настоящая работа.

Характеристика рассматриваемого метода расчета консолидации грунта

Инженерная методика раздельного расчета [1] предполагает достаточно быстрое приложение нагрузки на основание, при котором осадки натурального слоя развиваются с начальной (первичной) фильтрационной стадией, в частности выполняется следующее условие

$$\frac{c_v T_q}{H^2} \leq 0.075, \tag{1}$$

где T_q — время от начала до окончания приложения линейно-возрастающей нагрузки q ; c_v — коэффициент фильтрационной консолидации грунта; H — толщина нагружаемого натурального слоя.

Круг практических задач, в которых параметры консолидирующего слоя и график нагружения удовлетворяют условию (1), довольно широк. Равенство в (1) соответствует достижению 41% фильтрационной консолидации основания (степени консолидации U_{41}), что охватывает все случаи, когда требуется учет развития деформаций грунтового основания во времени, согласно нормативному критерию ПиНАЭ 5.10-87 «Основания реакторных отделений атомных станций», устанавливающему для оснований реакторных отделений атомных станций

граничную величину коэффициента затухания осадки $M_k = 0,7$, соответствующую U_{40} .

Чувствительные ограничения на применение методики [1] накладывает трудность адекватного учета существенной неоднородности консолидирующей толщи. В простейших случаях не слишком разнородной слоистой толщи могут использоваться способы осреднения деформационных и консолидационных параметров, основанные на методе осреднения коэффициентов сжимаемости и фильтрации в пределах H [5]. Применительно к c_v метод [5] приводит к осреднению в пределах H^2 . Методика [1] не применима и в иногда встречающихся на практике геологических разрезах со слоем не полностью водонасыщенного грунта (со степенью влажности $S_r < 1$), например, расположенного в капиллярной зоне над уровнем подземных вод (УПВ).

На рис. 1 представлена принципиальная схема инженерного метода [1], использующего для расчета консолидации натурального слоя четыре независимых параметра — $c_v(t_{70})$, $c_v(\varepsilon_{70}-\varepsilon_0)$, ε_p и c_{α} , определяемых по данным лабораторного консолидационного испытания по графику в координатах: относительная вертикальная деформация ε — десятичный логарифм времени lgt .

На основе обобщения опытных и теоретических данных в [1] установлено, что соответствующие сценариям А и Б графики рис. 1 описывают, соответственно, ожидаемые минимальные S_{min} и максимальные S_{max} проектные расчетные величины осадки основания. На этих графиках ε_p , ε_{70} , ε_p и t_{70} представляют собой характерные относи-

тельные деформации и время, а c_γ и c_α — уклоны промежуточного и заключительного участков графика. Взаимосвязь между c_γ и t_{70} , c_γ и $\varepsilon_{70}-\varepsilon_0$ описана в следующей основной части статьи. Здесь, завершая характеристику инженерного метода [1], отметим только, что $\varepsilon_0 > 0$ имеет место в лабораторном испытании из-за начальной степени влажности $S_{r0} < 1$ образца, в то время как в натурном слое, расположенном ниже УПВ, $S_{r0} = 1$ и для расчета консолидационных осадок слоя используются $\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$.

Актуальная методика определения параметров

Параметры инженерной модели [1] определяются по данным проведенных согласно Гл. 5.4 Метод компрессионного сжатия ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» консолидационных испытаний водонасыщенных образцов грунта ненарушенной структуры в одометре (рис. 2) путем комплексной обработки опытных графиков зависимости относительных деформаций ε от времени t , отсчитываемого от момента приложения рабочей нагрузки q .

Для исключения искажающего трения грунта об обойму 3 (см. рис. 2) и обеспечения представительности образца отношение начальной высоты h_0 испытываемых образцов к их диаметру должно быть не менее 1 : 3 при площади испытываемого образца не менее 40 см². Для восстановления природного состояния грунта, нарушенного при отборе, следует выполнить реконсолидацию образца — его предварительное уплотнение нагрузкой, соответствующей природному (бытовому) давлению σ_g на глубине отбора. Перед реконсолидацией необходимо обеспечить пропиткой снизу (восходящей фильтрацией) максимальное водонасыщение образца. В процессе последующего испытания уровень воды в приборе должен обязательно поддерживаться выше верха образца. Испытания проводятся, как правило, при двусторонней фильтрации.

При указанных стандартных толщинах образцов для успешного применения излагаемой методики имеют важное значение параметры нагрузочной ступени. Коэффициент нагрузки $\Delta\sigma/\sigma_j$ должен составлять не менее 0,5 (где $\Delta\sigma = q$ — величина приращения нагрузки; σ_j — эффективное напряжение в образце перед приращением).

Представляет интерес рекомендация ПиНАЭ 5.10-87 для грунтов оснований реакторных отделений атомных станций проводить испытания образцов с разными h_0 , в частности при $h_0 = 1$ см и 2,5 см, соответственно при односторонней и двусторонней фильтрации. Односторонняя схема позволяет осуществлять надежные измерения избыточного порового давления на недренированном торце образца. Реализация рекомендованных в ПиНАЭ 5.10-87 схем испытаний позволяет повысить их информативность [7] и улучшить качество выделения стадий преваляющей фильтрации и ползучести.

Давление от ступени нагрузки на образец в консолидационном опыте передается с учетом инерционности нагрузочной системы за 0,5–1 сек. Запись осадки s верха образца во времени t , отсчитываемом от момента приложения консолидационной ступени нагрузки, ведется по возможности автоматизировано (непрерывно). При «ручной» фиксации показаний индикаторов деформаций снятие отсчетов рекомендуется через 5, 15, 30 сек, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 85, 120 мин от мо-

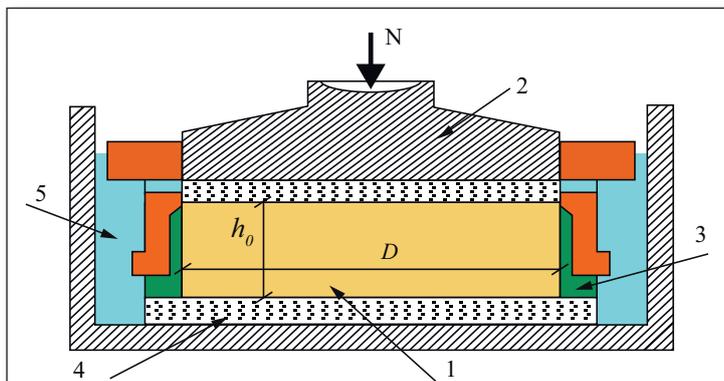


Рис. 2. Условия проведения консолидационного испытания образца водонасыщенного грунта ненарушенной структуры в компрессионном приборе (одометре): N — вертикальная нагрузка, 1 — образец грунта, 2 — жесткий штамп, 3 — гладкая жесткая обойма, 4 — жесткий пористый вкладыш, 5 — заполненное водой пространство

Fig. 2. Conditions for carrying out a consolidation test of a specimen of water-saturated soil in an undisturbed structure in a compression device (odometer): N — vertical load, 1 — soil sample, 2 — hard stamp, 3 — smooth rigid cage, 4 — rigid porous liner, 5 — space filled with water

мента приложения ступени нагрузки и далее через каждый час (не менее 6 часов), а в последующем — 2 раза в сутки с интервалом не менее 8 часов. Данные интервалы времени обеспечивают надлежащую обработку консолидационных графиков в достаточно равномерных шкалах корня квадратного и логарифма времени. Согласно ГОСТ 12248-2010 консолидационное испытание продолжается до «установления линейного участка вторичной консолидации». В предлагаемой методике наряду с этим требуется достижение условной стабилизации деформаций грунта, которая считается достигнутой в случае, если за последние 16 часов испытания заданной ступенью нагрузки приращение относительной вертикальной деформации грунта $\varepsilon = s/h_0$ не превысило 0,5%.

Обработка данных консолидационного испытания проводится путем согласования опытных графиков с расчетными зависимостями. Для фильтрационной (первичной) стадии привлекается предложенное К. Терцаги [15] аналитическое решение в виде ряда Фурье

$$U = 1 - 2 \sum_{m=0}^{\infty} \exp(-M^2 T) / M^2, \quad (2)$$

где $M = \pi^2(2m+1)/2$, $T = c_v t / h_a^2$ — фактор времени, $h_a = h_0$ при одностороннем дренаже лабораторного образца и $h_a = h_0/2$ при двухстороннем; U — степень фильтрационной консолидации.

Бесконечный ряд (2) хорошо аппроксимируется (погрешность регрессии менее 0,5%) следующими аналитическими формулами² [9]

$$U = 2\sqrt{T/\pi} \text{ при } U \leq 0.52 = U_{52} \quad (T \leq T_{52} = 0.213), \quad (2.1)$$

$$U = 1 - 8 \exp(-\pi^2 T / 4) / \pi^2 \text{ при } U \geq U_{52} \quad (T \geq T_{52}). \quad (2.2)$$

Сопоставление ряда (2) и формул (2.1) и (2.2) представлено на рис. 3. Отметим важные особенности. У ряда (2) и формулы (2.2) совпадает асимптота $U = 1$. Двойное диф-

² Безволев С.Г., 1990. Нелинейный расчет одномерной консолидации водонасыщенного вязкого грунта. Дис. ... канд. техн. наук, Москва.

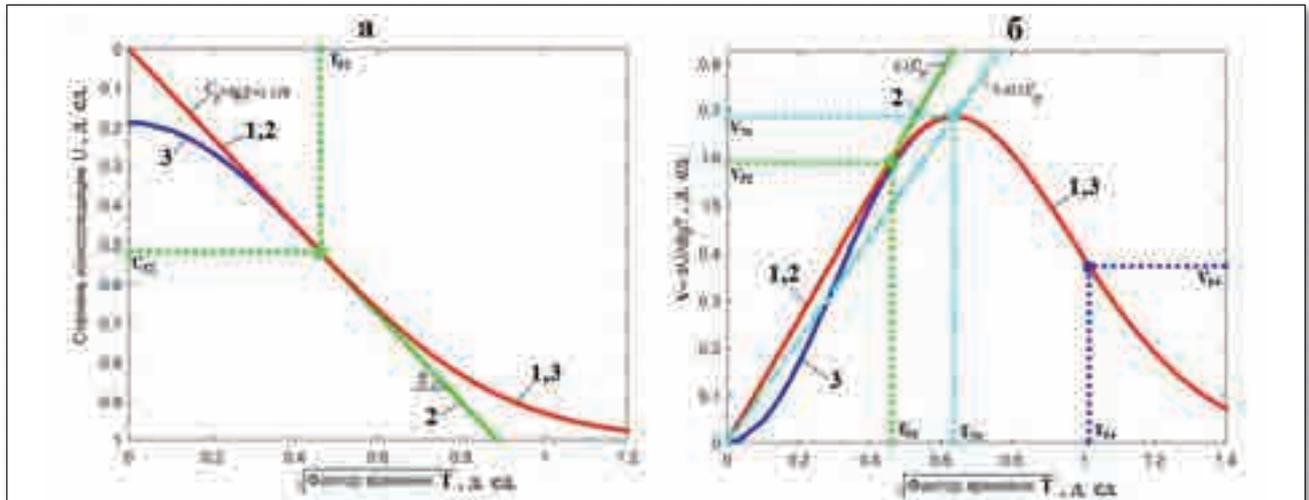


Рис. 3. Сопоставление точного решения (2) и упрощенных аппроксимаций (2.1) и (2.2): а — оценка совпадения (2), (2.1) и (2.2); ● — точка наилучшего совпадения; б — то же по производным и местам перегибов (треугольники); 1 — расчет по (2); 2 — расчет по (2.1); 3 — расчет по (2.2); штрих-пунктир — секущая максимума (2); ● — точка максимума (2)

Fig. 3. A comparison of the exact solution (2) and simplified approximations (2.1) and (2.2): а — an estimate of the coincidence of (2), (2.1) and (2.2); ● — best match point; б — the same for derivatives and points of inflections (triangles); 1 — calculation of (2); 2 — calculation of (2.1); 3 — calculation of (2.2); dash-dot — secant high; ● — maximum point

ференцирование (2) и (2.2) с поиском экстремума показывает, что точке перегиба зависимости $U-\log T$ для (2) и (2.2) соответствует степень фильтрационной консолидации $U_{70} = 0,701$ ($T_{70} = 4/\pi^2 \approx 0,405$) и максимум уклона касательной $(\partial U/\partial \log T)_{70} = 8 \exp(-1) \ln(10)/\pi^2 \approx 0,6869$. Перегибы производной $\partial U/\partial \log T$ (экстремумы второй производной) для (2) соответствуют U_{45} ($T_{45} = 0,159$) и U_{94} ($T_{94} = 1,06$). У (2.2) такой же перегиб при U_{94} , а у (2.1) хотя перегибы и отсутствуют, но в области $U=0 \dots U_{52}$ производные практически те же (погрешность менее 0,5%), что и у (2). Таким образом, в указанных диапазонах (2.1) и (2.2) хорошо аппроксимируют ряд (2) и по производным. На рис. 3, а показано, что прямолинейная зависимость (2.1) имеет уклон $C_B = 2/\sqrt{\pi} \approx 1,128$. На рис. 3, б обратим также внимание, что начальная касательная имеет уклон $0,5C_B$, проведенная через максимум секущая обладает уклоном $0,415C_B$ ($0,5/0,415 = 0,83$), а $T_{70}/T_{52} = 0,405/0,213 = 1,91$ и $T_{94}/T_{70} = 1,06/0,405 = 2,62$.

Представленные аналитические аппроксимации ряда (2) и установленная Бьюсманом [10] линейная полулוגарифмическая зависимость вторичной консолидации позволяют разработать удовлетворительную методику определения параметров инженерного метода [1].

Обработка полученных на испытательной ступени данных ведется в следующей последовательности. На графике в координатах относительная вертикальная деформация ε — десятичный логарифм времени $\lg t$ предварительно оцениваем местоположение точки перегиба $\varepsilon_{70}-t_{70}$ (рис. 4, а), в которой достигается степень фильтрационной консолидации U_{70} , а уклон касательной — максимум.

В упрощенном варианте по t_{70} определяем границу теоретического прямолинейного участка графика $\varepsilon-\sqrt{t}$, соответствующую времени $t_{52} = t_{70}/1,91$ ($1,91 = T_{70}/T_{52} = t_{70}/t_{52}$). По графику $\varepsilon-\sqrt{t}$ (рис. 4, б) путем проведения усредняющей прямой через опытные точки временного интервала $]0-t_{52}[$ определены величины уклона $c_B = \text{tg} \beta$ и начальной упруго-мгновенной объемной деформации ε_0 , обусловленной не-

полным водонасыщением (степенью влажности $S_{r0} < 1$) образца ($S_{r0} = 1$ теоретически соответствует $\varepsilon_0 = 0$, однако такое полное водонасыщение образца может быть достигнуто лишь при использовании противодавления).

Для повышения достоверности параметры $c_B = \text{tg} \beta$ и ε_0 определяют по полным данным первичного этапа (полузакнутого промежутка $]0-t_{70}[$) посредством регрессионного анализа, например, методом наименьших квадратов по ГОСТ 20522-2012 «Методы статистической обработки результатов испытаний» или одним из более общих (не ограниченных нормальным типом распределения) способов³. Для прямолинейной регрессии опытные точки t_i отрезка $[t_{52}-t_{70}]$ предварительно приводятся к теоретической прямой $\varepsilon-\sqrt{t}$. Для этого определяем приведенное время $t_i^* = k_i t_i$, с коэффициентом приведения

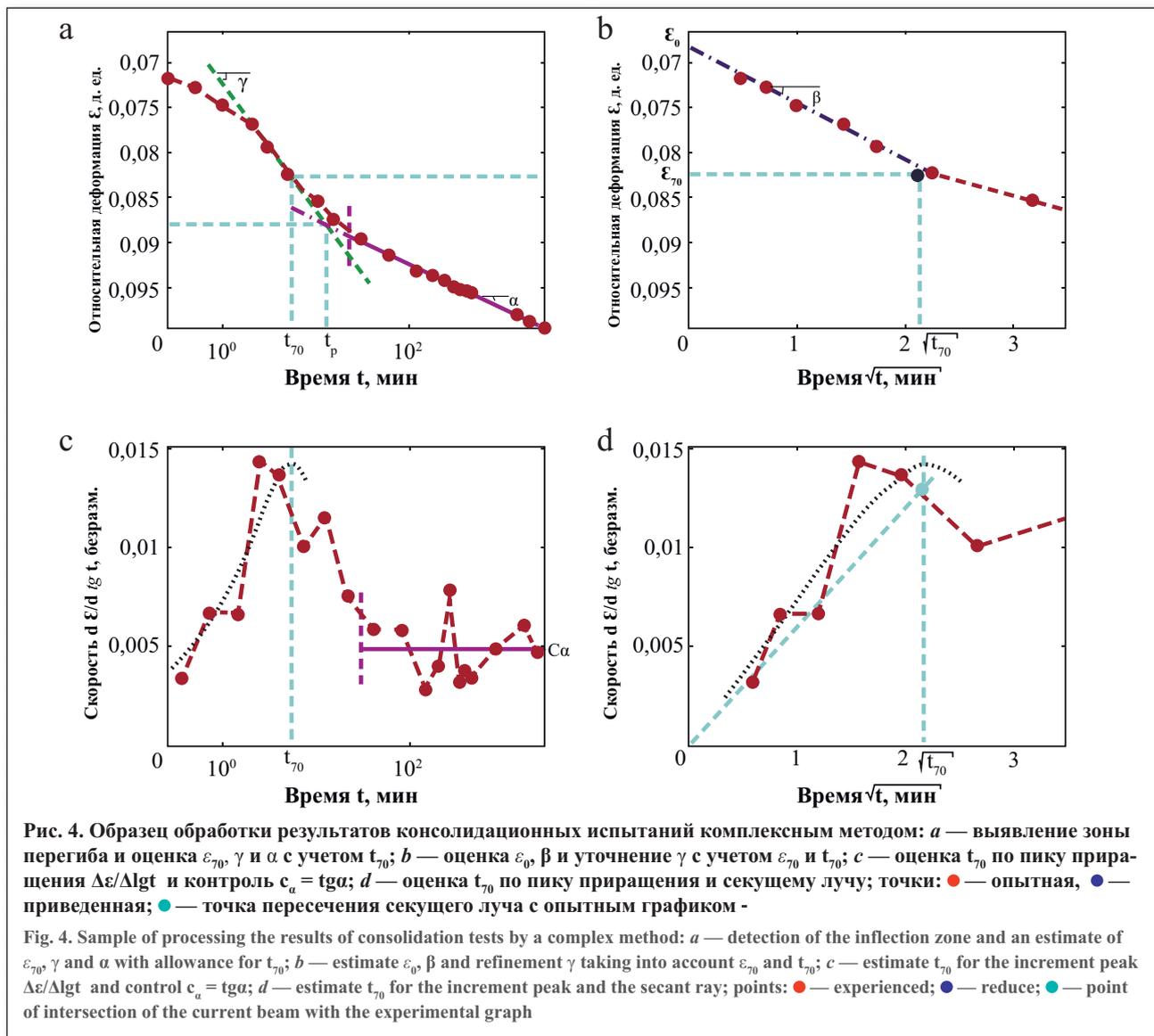
$$k_i = \frac{\pi^3 t_{70}}{16 t_i} [1 - \exp(-t_i/t_{70}) 8/\pi^2] \leq 1. \quad (3)$$

Попутно следует отметить, что аналогичным образом для прямолинейной регрессии могут быть приведены опытные точки t_i отрезка $[t_{52}-t_{90}]$ для повышения достоверности метода Тейлора [14], в обычной редакции которого t_{90} определяются по теоретической секущей и опытные точки интервала $]t_{52}-t_{90}[$ практически выводятся из рассмотрения.

Полученные величины c_B и ε_0 позволяют уточнить время перегиба t_{70} . По графику приращений (между соседними точками фиксации деформаций) деформаций $\Delta \varepsilon/\Delta \lg t - \sqrt{t}$ (рис. 4, д) ищется крайнее пересечение луча, проведенного из точки 0 с уклоном $0,415c_B$, с опытным графиком. Это пересечение теоретически (см. рис. 3, б) соответствует t_{70} и максимуму производной $(\partial \varepsilon/\partial \lg t)_{70} = c_B = \text{tg} \gamma = (\partial U/\partial \lg T)_{70} \times (\varepsilon_{100}-\varepsilon_0) = 0,6869(\varepsilon_{70}-\varepsilon_0)/0,701 = 0,9788(\varepsilon_{70}-\varepsilon_0)$.

Степень негативного влияния ограниченности технического уровня нагрузочного и измерительного оборудования демонстрируется размахом «пилообразности» графиков $\Delta \varepsilon/\Delta \lg t - \lg t$ и $\Delta \varepsilon/\Delta \lg t - \sqrt{t}$ (для оценки размаха «пи-

³ Поршнева С.В., Овечкина Е.В., Каплан В.Е., 2006. Теория и алгоритмы аппроксимации эмпирических зависимостей и распределений. Екатеринбург: УрО РАН.



лообразности» на рис. 4, *c* и 4, *d* пунктирной кривой показана найденная теоретическая зависимость).

Используя $t_{94} \approx 2,62t_{70}$, предварительно оцениваем начало вторичного участка графика $\varepsilon - lgt$ (см. рис. 4, *a*). Для $t_i > t_{94}$ путем проведения усредняющей прямой через опытные точки определяем величины уклона $c_\alpha = tga$ и точку $\varepsilon_p - t_p$ пересечения прямых, соответствующих c_γ и c_α , методом А. Казагранде [11]. Для повышения достоверности параметры c_α , ε_p и t_p определяют посредством регрессионного анализа (на рис. 4, *c* разброс измеренных на вторичном участке значений $\Delta\varepsilon/\Delta lgt$ («пилообразность» графика $\Delta\varepsilon/\Delta lgt - lgt$) относительно усредняющего горизонтального отрезка иллюстрирует доверительный интервал c_α).

После достижения согласования между величинами ε_{70} , t_{70} , c_p , c_γ и c_α , определяемым по графикам $\Delta\varepsilon/\Delta lgt - lgt$, $\varepsilon - lgt$ и $\varepsilon - \sqrt{t}$, используемая в общем случае инженерной методики [1] для расчета фильтрационного участка натурного графика величина c_v определяется по t_{70} из выражения для фактора времени (2)

$$c_v = \frac{h^2}{\pi^2 t_{70}}, \quad (4)$$

где h — толщина двухсторонне дренированного лабораторного образца.

По существу, изложенная комплексная методика основана на модификации предложенных Казагранде [11] и Тейлором [14] в стандарте США ASTM D 2435-04 «Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading» построений, их дополнении и согласовании. Из метода [11] применяется проведение касательной через точку перегиба (см. рис. 4, *a*), а из метода [14] — проведение прямой квадратного корня и отсечки ε_0 (см. рис. 4, *b*). Методика подразумевает возможность выделения начальной (первичной) фильтрационной стадии консолидации образца грунта, когда превалирует влияние его фильтрационного сопротивления отжатию поровой воды, и заключительной (вторичной) стадии, когда превалирующим является вязкое сопротивление скелета грунта сжатию под нагрузкой. Несмотря на то, что вязкость грунта проявляется на всех этапах сжатия грунта, при достаточно больших его скоростях, характерных для начального фильтрационного этапа, наблюдается практически однозначное соотношение между эффективными напряжениями и деформациями, образующими некую асимптотическую «упруго-мгновенную стенку» деформаций сжатия. Такое однозначное соотношение является главным критерием первичности консолидационного процесса, по сравнению с вторичным, обусловленным запаздыванием вязкопластических деформаций [2].

В заключение раздела необходимо отметить также, что нередко на практике используется способ [4 и др.] расчета коэффициента фильтрации грунта k_v по величине c_v с использованием теоретического выражения [15]

$$c_v = \frac{k_v}{\gamma_w m_v}, \quad (5)$$

где γ_w — удельный вес поровой воды; m_v — коэффициент относительной сжимаемости грунта, определенный по стабилизированной компрессионной кривой.

Этот способ нельзя считать приемлемым, потому что m_v является показателем стабилизированной деформации сжатия, в то время как в установленной по формуле (4) величине c_v заложены упомянутые упруго-мгновенные деформации, характерные для начального фильтрационного этапа. Таким образом, для обратного расчета k_v по величине c_v необходимо использовать специальный коэффициент упруго-мгновенных деформаций m_v^{em} . Величина этого коэффициента может быть прямым образом установлена путем дополнения консолидационных испытаний измерениями избыточного порового давления Δp в образце. Корректный способ определения k_v по данным консолидационного испытания с измерениями Δp предложен в нашей работе [5]. Недостоверность определения k_v с применением m_v была показана опытным путем в работе [3]. Эталонным для определения k_v пылевато-глинистых грунтов является длительный опыт с падающим градиентом напора по ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».

Актуальность применения предложенной в настоящей работе методики определения консолидационных параметров и способа определения k_v [5] обусловлена тем, что некритичное использование методик для определения c_v методами А. Казагранде [11] или Д. Тейлора [14], заложенных в действующие ГОСТ 12248-2010 и стандарт США ASTM D 2435-04, а также расчета k_v по формуле (5), могут приводить к различающимся в разы консолидационным и фильтрационным прогнозам [8, 13, 16].

Пример применения методики

Пример разработан применительно к условиям натурального совместного советско-финского эксперимента [6, 12] на площадке «Ольгино», расположенной в северо-западной части Санкт-Петербурга.

По результатам инженерно-геологических изысканий, в естественном основании под слоем сильно разложившегося верхового торфа толщиной 0,9 м до глубины 2,6 м

залегает слой суглинка серого текучепластичного с растительными остатками. Суглинок подстилается слоем погребенного среднеразложившегося торфа. Образцы ненарушенной структуры для компрессионно-консолидационных испытаний отбирались после стабилизации осадок грунтов от веса подготовительного слоя песка толщиной 1 м, отсыпанного на заболоченной поверхности верхового торфа. Натурный эксперимент проводился в рамках научно-исследовательской работы по проекту устройства предпостроечного намывного основания толщиной порядка 3 м под строительство жилого микрорайона. Намыв предполагается вести широкими захватками, возводимыми высокими темпами за двое–трое суток.

Исследования перекрывающих слой суглинка торфов показали, что они обладают очень высокой проницаемостью, особенно в горизонтальном направлении, и могут рассматриваться как дренажные поверхности слоя текучего суглинка. С учетом подготовительного слоя бытового давления σ_v в центре слоя суглинка составляет порядка 50 кПа. Такой же является и величина ожидаемой рабочей нагрузки q под проектным намывным основанием. Эта ступень нагружения с коэффициентом нагрузки $\Delta\sigma/\sigma_v = 50/50$ кПа рассматривалась в качестве консолидационной в проведенных грунтовой лаборатории ГПИ «Фундаментпроект» компрессионно-консолидационных испытаниях образцов суглинка.

Таким образом, условия дренирования натурального слоя суглинка и лабораторных образцов полностью соответствовали требованиям изложенной методики определения параметров инженерного метода расчета [1].

Исследованный суглинок относится к послеледниковым морским литориновым отложениям. Его стандартные физико-механические характеристики приведены в таблице.

Монолиты грунта диаметром 120 и высотой 220 мм отбирались с помощью тонкостенных грунтоносов со съемными пластмассовыми гильзами. Внедрение грунтоноса осуществлялось осторожным задавливанием в предварительно зачищенный забой скважины. Сразу же после извлечения грунтоноса из скважины пробу вместе с гильзой закрывали с торцов крышками и парафинировали с одновременной обмоткой марлей. Период хранения монолитов составлял не более 20 суток. Образцы грунта для испытаний начальной толщиной $h_0 \approx 20$ мм вырезались из центральной части монолитов, которая наименее подвержена структурным изменениям при отборе.

Последовательность проведения и методика обработки консолидационной ступени изложена выше, а ее результаты

Таблица
Table

Физико-механические характеристики исследованного суглинка Physical and mechanical characteristics of the investigated loam	
Характеристика	Значение
Плотность частиц, г/см ³	2,71
Влажность природная, %	47
Влажность на границе раскатывания, %	29
Влажность на границе текучести, %	41
Содержание гумуса, %	1
Компрессионный модуль деформации, МПа	0,7
Угол внутреннего трения, град	8
Сцепление, кПа	3

показаны на рис. 4. Получены следующие величины основных (независимых) параметров инженерного метода [1]: $\varepsilon_{\gamma 0} = 0,0827$, $\varepsilon_p = 0,0880$ и $c_a = 0,00488$ и рассчитанный по формуле (4) $c_v = 3,36$ м²/год. Результаты расчета по полученным консолидационным параметрам развития во времени осадок натурального слоя суглинка приведены на рис. 1.

Заключение

Проектирование и устройство оснований и фундаментов при строительстве на территориях, сложенных сильно-сжимаемыми медленно деформирующимися грунтами, такими как водонасыщенные глинистые, илистые, заторфованные и прочие грунты, обладающие существенным вязким и фильтрационным сопротивлением, пред-

ставляет собой комплекс сложных научно-технических задач, для успешного решения которых требуется всесторонний учет условий, влияющих на выбор рационального типа и конструктивных решений основания и фундаментов и надлежащей методики их расчета. Для внедрения в проектную практику эффективных методов консолидационных расчетов и получения адекватных результатов необходимо наличие подробной методики определения привлекаемых параметров грунта, которая должна учитывать особенности расчетной модели, для которой эти параметры предназначены. Практичная методика определения достоверных параметров сжимаемости, ползучести и фильтрации для применения инженерного метода [1] предложена в настоящей работе. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безволев С.Г., 2018. Актуализированная методика инженерного расчета первичной и вторичной консолидации водонасыщенных грунтов. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1, с. 2–8.
2. Безволев С.Г., 2011. Первичная и вторичная консолидация грунтов. Реологические модели и практика расчетов. Геотехника, № 1, с. 22–47.
3. Бойченко П.О., 1950. Расчеты коэффициента фильтрации связных грунтов косвенным методом и построение теоретических кривых консолидации. Ученые записки ЛГУ, Серия геологических наук, Том 102, Вып. 1, с. 199–234.
4. Жихович В.В., 1981. Определение коэффициента фильтрации водонасыщенного глинистого грунта по кривой осадки при компрессионном испытании. Гидротехническое строительство, № 12, с. 36–37.
5. Коновалов П.А., Безволев С.Г., 1991. Способ определения коэффициента фильтрации глинистых грунтов. Авторское свидетельство СССР № 1702307, № 48.
6. Коновалов П.А., Гончаров В.Г., Платонов Ю.Н., Зехниев Ф.Ф., 1993. Результаты исследований процесса консолидации дренированных многослойных заторфованных оснований. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, с. 18–23.
7. Тер-Мартirosян З.Г., 1986. Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов. Недра, Москва.
8. Akagi T., 1979. State-of-the art report on settlement and time rates of consolidation. Geotechnical Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 179–198.
9. Al-Zoubi M.S., 2008. Consolidation Characteristics Based on a Direct Analytical Solution of the Terzaghi Theory. Jordan Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 91–99.
10. Buisman A.S.K., 1936. Results of long duration settlement tests. Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 1936, Vol. 1, pp. 103–106.
11. Casagrande A., Fadum R.E., 1940. Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. Harvard Soil Mechanics, Cambridge, Mass, No. 8.
12. Korhonen K.H., 1987. Subsoil improvement test field Leningrad-Olgino: Soviet-finnish technical scientific cooperation group 1, 2 in the topic "Design and construction of foundation on weak ground": Test Report, Helsinki.
13. Olson R.E., 1986. State of the art: Consolidation of Soils: Testing and Evaluation. ASTM STP 892, Philadelphia, pp. 7–70.
14. Taylor D.W., 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. New York, Wiley.
15. Terzaghi K., 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitiziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydro-dynamischen Spannungerscheinungen. Sitzungsberichte: Mathematisch naturwissenschaftliche Klasse, Akademie der Wissenschaften in Wien, T. 2a, No. 3/4, pp. 125–138. (in German)
16. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G., 1996. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York, Wiley.

REFERENCES

1. Bezvolev S.G., 2018. Actualized technique of engineering calculation of primary and secondary consolidation of water-saturated soils. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 55, No. 1, pp. 2–8. (in Russian)
2. Bezvolev S.G., 2011. Primary and secondary consolidation of soils. Rheological models and calculation practice. Geotechnics, No. 1, pp. 22–47. (in Russian)
3. Boychenko P.O., 1950. Calculations of the coefficient of filtration of cohesive soils by an indirect method and construction of theoretical consolidation curves. Scholarly notes of Leningrad State University, Series of geological sciences, Vol. 102, Issue 1, pp. 199–234. (in Russian)
4. Zhikhovich V.V., 1981. Determination of the filtration coefficient of water-saturated clay soil along the precipitation curve in the compression test. Hydrotechnical construction, No. 12, pp. 36–37. (in Russian)

5. Konovalov P.A., Bezvolev S.G., 1991. Method for determining the coefficient of filtration of clay soils. A.S. USSR № 1702307, № 48. (in Russian)
6. Konovalov P.A., Goncharov V.G., Platonov Yu.N., Zekhniev F.F., 1993. The results of studies of the process of consolidation of drained multilayered decanted bases. Soil Mechanics and Foundation Engineering, No. 5, pp. 18–23. (in Russian)
7. Ter-Martirosyan Z.G., 1986. Forecast of mechanical processes in arrays of multiphase soils. Nedra, Moscow. (in Russian)
8. Akagi T., 1979. State-of-the art report on settlement and time rates of consolidation. Geotechnical Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 179–198.
9. Al-Zoubi M.S., 2008. Consolidation Characteristics Based on a Direct Analytical Solution of the Terzaghi Theory. Jordan Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 91–99.
10. Buisman A.S.K., 1936. Results of long duration settlement tests. Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 1936, Vol. 1, pp. 103–106.
11. Casagrande A., Fadum R.E., 1940. Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. Harvard Soil Mechanics, Cambridge, Mass, No. 8.
12. Korhonen K.H., 1987. Subsoil improvement test field Leningrad-Olgino: Soviet-finnish technical scientific cooperation group 1, 2 in the topic "Design and construction of foundation on weak ground": Test Report, Helsinki.
13. Olson R.E., 1986. State of the art: Consolidation of Soils: Testing and Evaluation. ASTM STP 892, Philadelphia, pp. 7–70.
14. Taylor D.W., 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. New York, Wiley.
15. Terzaghi K., 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydro-dynamischen Spannungsercheinungen. Sitzungsberichte: Mathematisch naturwissenschaftliche Klasse, Akademie der Wissenschaften in Wien, T. 2a, No. 3/4. pp. 125–138. (in German)
16. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G., 1996. Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York, Wiley.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЗВОЛЕВ СТЕПАН ГЕОРГИЕВИЧ

Старший научный сотрудник лаборатории механики мерзлых грунтов и расчета оснований НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»», к.т.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

STEPAN G. BEZVOLEV

Senior research scientist of the Department of Frozen soil mechanics and Foundation analysis, Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIOSP), JSC Research Center of Construction, PhD (Candidate of Science in Technics), Moscow, Russia

